ملاحظات في فيزياء الكهرباء – فرق الجهد الكهربائي (electric potential difference) أو الفولتية (voltage)
بركات سرور - @barakatsoror

الجسيمات التحت ذرية (subatomic partials)

هناك عدد من الجسيمات في الطبيعة أبسط من الذرة تسمى بالجُسيمات التحت ذرية، من هذه الجسيمات النيوترون والبروتون والإلكترون والتي تتكون منها الذرة وهناك عشرات الجسيمات الأخرى غيرها، لكل من هذه الجسيمات خصائص طبيعية يمكن قياسيها ومقارنتها مثل الكتلة والشحنة الكهربائية وغيرها من الخصائص، أهم خاصية تهمنا عند دراسة الكهرباء هي الشحنة الكهربائية.

الشحنة الكهربائية (electric charge) والقوة الكهربائية (electric force)

هناك قوة في الطبيعة تجعل بعض الجسيمات تنجذب لجسيمات أخرى، وتجعل بعض الجسيمات تطرد جسيمات أخرى، وليست كل الجسيمات تتأثر بتلك القوة، لكن كل الجسيمات التي تتأثر بها تطرد الجسيمات المشابهة لها.

فمثلاً تطرد الإلكترونات بعضها، وتطرد البروتونات بعضها، بينما ينجذب الإلكترون والبروتون لبعض، وهناك جسيمات يظهر أنها لا تجذب ولا تطرد الجسيمات الأخرى -ولا بعضها- كالنيوترون.

سميت تلك القوة بالقوة الكهربائية، وسمي مقدار تأثر الجسيمات بتلك القوة بالشحنة الكهربائية، حيث قسمت الجسيمات وفقها لمجموعتين:

- جسيمات سميت جسيمات موجبة الشحنة ووضع البروتون في هذه المجموعة
- جسيمات سميت جسيمات سالبة الشحنة ووضع الإلكترون في هذه المجموعة

أي جسيمين من نفس المجموعة دائماً سيطردان بعض، وأي جسيمين من مجموعة مختلفة دائماً سيجذبان بعض، واعتبرت الجسيمات التي لا تتفاعل مع الجسيمات الأخرى جسيمات متعادلة الشحنة، وعندما يرتبط جسيم موجب الشحنة مع جسيم سالب الشحنة لهما نفس مقدار الشحنة لكن إشارتهما مختلفة فإنهما يصبحان معاً متعادلان ويفقدان التأثر بالقوة الكهربائية.

كان يمكن نسمي تلك المجموعين بأي اسمين، لكن اخترنا سالب وموجب لنتمكن من بناء أدوات رياضية حولها.

الشحنة خاصية من خصائص المادة مثلها مثل الكتلة تملكها جسيمات أخرى وليس فقط الإلكترون والبروتون، فمن الشائع الخطأ واعتقاد أن الشحنة الكهربائية تعني الإلكترون أو البروتون، فالشحنة الكهربائية خاصية، بينما الإلكترون والبروتون جسيمان يمتلكان تلك الخاصية وغيره جسيمات أخرى لم أذكرها تملك أيضاً تلك الخاصية.

نظرة على الذرات

تتكون المواد في الطبيعية من ذرات، وتتكون أنوية تلك الذرات من بروتونات موجبة الشحنة ونيوترونات متعادلة الشحنة، كون النيوترونات متعادلة فهذا يجعل نواة الذرة موجبة الشحنة، بالإضافة لإلكترونات حرُة سالبة الشحنة تتواجد حول النواة الموجبة الشحنة.

تختلف الذرات عن بعض باختلاف عدد البروتونات والنيوترونات في النواة، يرمز للذرة عادةً باستخدام رمز يتكون من حرف أو حرفين يميز الذرة، وبجانب هذا الرمز عدد صغير يوضع أسفل يسار رمز العنصر يشير لعدد البروتونات في النواة يسمى العدد الذري (atomic number)، لا يهمنا هنا عدد النيوترونات في النواة لأن النيوترون متعادل الشحنة ولا يساهم في شحنة الذرة.

تتكون ذرة الهيدروجين والتي يرمز لها بالرمز $_1\mathrm{H}$ من نواة فيها بروتون واحد وحول النواة إلكترون، وتتكون ذرة الليثيوم $_3\mathrm{Li}$ من ثلاث بروتونات في النواة حول النواة ثلاث إلكترونات، وتتكون نواة النحاس $_{29}\mathrm{Cu}$ من 29 بروتون وحول النواة 29 إلكترون، يمكنك أن تطلع على جدول العناصر الدوري.

في الحالة الطبيعية تكون الذرة متعادلة وعدد الإلكترونات مساوي لعدد البروتونات في النواة، عندما تفقد الذرة إلكترونات أو تكتسب إلكترونات أكبر من عدد بروتونات النواة عند حدوث تفاعل كيميائي فإنها تتأين وتصبح أيون (ion) موجب الشحنة لو كان عدد الإلكترونات أقل من البروتونات، أو أيون سالب الشحنة لو كان عدد الإلكترونات أكبر من عدد البروتونات، مجموع الشحنات في ذرات المادة يجعل تلك المادة بشكل عام موجبة أو سالبة الشحنة أو متعادلة.

عند أي مستوى من مستويات المادة يمكن أن نتحدث عن الشحنة الكهربائية؟

الجسيمات التحت ذرية كالبروتونات والنيوترونات والإلكترونات هي من يحمل الشحنة، وهذه الجسيمات تبني الذرات بمختلف أنواعها كالأكسجين والليثيوم والنحاس، وتلك الذرات تبنى منها المركبات الكيميائية الأعقد.

يمكننا أن نعتبر أن الذرة تحمل شحنة لو جمعنا شحنات البروتونات والإلكترونات فيها، ولو أخذنا الذرات المكونة للمادة والتي قد تتكون من ذرات من نفس العنصر أو ذرات عناصر مختلفة فيمكننا أن نعتبرها تحمل شحنة كهربائية لو جمعنا شحنات الذرات في تلك المادة، تماماً مثلما أنه يمكننا جمع كتل الجسيمات في كتلة واحدة، فإنه يمكننا أن نجمع شحنات الجسيمات في شحنة واحدة.

من الآن فصاعداً سنتحدث عن أجسام تحمل شحنة كهربائية بغض النظر عن ماهية هذه الأجسام.

قانون كولوم (Coulomb law)

في القرن السابع عشر وقبل اكتشاف الجسيمات التحت ذرية أجرى الفيزيائي الفرنسي تشارلز كولوم (Charles Coulomb)، دراسات وتجارب لقياس القوة الكهربائية -قوة الجذب والطرد بين الأجسام التي تحمل شحنة كهربائي- وقياس كمية الشحنة الكهربائية في المواد -مقدار تأثرها بالقوة الكهربائية.

لاحظ كولوم من تجاربه أن:

اتجاه القوة F بين كُرَتين q_1 و q_2 مشحونتين يعتمد على إشارة شحنة الكرتين، فلو كانت شحنتهما مختلفة فإنها سينجذبان لبعض بقوة بمقدارٍ ما، ولو كانت شحنة الكرتين معاكسة فإنهما سيبتعدان عن بعض بنفس مقدار القوة لكن في الاتجاه المعاكس.

ولاحظ أيضاً أن تلك القوة تتناسب طردياً مع كمية الشحنة في الكرتين $F \propto q_1 q_2$، فلو كانت أحد الكرتين ضعف حجم الكرة الثانية، فإن القوة ستكون أكبر بمرتين.

ولاحظ من تجاربه أن تلك القوة تتناسب عكسياً مع ضِعف المسافة بينهما $F \propto \frac{1}{r^2}$، فلو ابتعدت الكرتين عن بعض ضِعف المسافة فإن القوة ستقل للربع.

وجد أن قيمة التناسب قيمة ثابتة تعتمد على نوع الوسط الذي يفصل بين الكرتين، ورمز لها بالرمز k ويسمى بثابت كولوم (Coulomb constant)، حُسب ووجد أنه يساوي في حالة الهواء تقريباً $9 \times 10^9 Nm^2/C^2$، لا يهمنا كثيراً لأننا لن نجري حسابات على أعداد.

جُمعت تلك الملاحظات فيما يعرف الآن بقانون كولوم[1]:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

تقاس القوة الكهربائية مثل كل القوى بوحدة النيوتن (newton) والتي يرمز لها بالرمز N.

من هذا القانون أمكن قياس القوة الكهربائية بين الشحنات ومقدار الشحنة الكهربائية في المادة، وسميت وحدة قياس الشحنة الكهربائية بالكولوم ويرمز لها بالرمز C.

المجال الكهربائي (electric field) وشدة المجال الكهربائي (electric field strength)

هناك مجال يحيط بالجسم المشحون يسمى بالمجال الكهربائي ويظهر فيه تأثير القوة الكهربائية على الأجسام المشحونة الأخرى، هذا المجال ينشأ لحظياً بمجرد أن يصبح الجسم مشحون ويمتد للانهاية، لكن تأثير تلك القوة الكهربائية يتضاعف عندما نقترب من الجسم ويهوي تأثيرها للصفر عندما نبتعد عنه، وتختلف طبعاً قيمة تلك القوة في هذا المجال باختلاف شحنة الجسم.

---

[1] حتى نبسط الأمور سنستخدم الصيغة العددية (scalar form) لقانون كولوم، القيمة الموجبة تعني أن اتجاه القوة لليمين والسالبة تعني يسار، لكننا هكذا نفترض أن العالم أحادي البعد أو مجرد خط بينما عالمنا ثلاثي الأبعاد، هناك صيغة أعم وهي الصيغة متجهيه (vector form) لقانون كولوم:

$$\vec{\boldsymbol{F}}_{21} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{\boldsymbol{r}}_{21}$$

وتسمح لنا بالتعبير عن باقي الأبعاد الثلاثة، لكنها تضيف تعقيد رياضي لا نحتاجه هنا

لنسمي قيمة القوة الكهربائية عند نقطة معينة في هذا المجال الكهربائي بشدة المجال الكهربائي، ويمكننا أن نعبر عنها بأنها مقدار القوة التي يؤثر فيها جسم مشحون Q على جسم آخر مشحون ذو شحنة موجبة q لو وضع عند تلك النقطة -اخترنا شحنة موجبة كي لا نعكس اتجاه القوة:

$$E = \frac{F}{q}$$

ووحدتها نيوتن لكل كولوم NC^{-1} ، طبعاً هذه القيمة ستختلف عند كل نقطة، وإشارتها تشير لإشارة القوة الكهربائية.

لو افترضنا أن شحنة الجسم الأول تساوي Q وعوضنا قيمة F في المعادلة السابقة بقانون كولوم $F = kQq/r^2$ ثم بسطناها:

$$E = \frac{k\frac{Qq}{r^2}}{q}$$

فإننا سنحصل على معادلة جديدة للتعبير عن شدة المجال الكهربائي لجسم شحنة Q عند أي نقطة تبعد عنه المسافة r:

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

استخدام فكرة المجال الكهربائي وشدة المجال الكهربائي مفيدة لأننا الآن لا نحتاج لوجود جسم آخر مشحون كي نعبر عن القوة وسنعرف مقدار القوة التي سيختبرها جسم آخر مشحون لو وجد عند تلك النقطة، فلو أردنا حساب مقدار القوة الكهربائية التي سيختبرها الجسم الآخر عند نقطة ونعرف شدة المجال الكهربائي عند تلك النقطة فيمكننا أن نضرب قيمة شحنة الجسم الآخر q بشدة المجال الكهربائي للأول وسنعرف مقدار القوة:

$$F = qE$$

مثلما يمكننا أن نجمع الشحنات الكهربائية لمجموعة أجسام، فإنه يمكننا أن نجمع شدة المجالات الكهربائية للأجسام ونعتبرها مجال كهربائي واحد.

الشغل (work) والطاقة (energy) وفرق الجهد الكهربائي (electric potential difference)

لو كان عندنا جسمين موجبين الشحنة أحدهما مثبت والثاني حر ونريد تقريب الجسم الحر للثابت، فبديهياً أن الجسم الحر لن يقترب لوحده ولا بد أن نقوم نحن بشيء كأن نبذل جهد أو نستهلك طاقة ما للتغلب على القوة الكهربائية التي تحاول إبعادهما عن بعض.

يسمى هذا المجهود بشكل عام في الفيزياء بالشُغل، ويعرف بأنه مقدار القوة المضادة الازمة لنقل جسم من مكان لآخر في خط مستقيم في وجه قوة أخرى:

$$W = F\,r$$

F هي القوة الازمة مننا بالنيوتن وهي بنفس مقدار القوة التي نريد التغلب عليها لكن في الاتجاه المعاكس، و r هي المسافة بالمتر بين النقطة التي بدأنا منها والنقطة التي توقفنا عندها ووحدتها Nm، ونظراً لأهمية هذه الوحدة أعطيت اسمها الخاص وهو الجول (joule) ويرمز لها بالرمز J، الشغل والطاقة لهما نفس الوحدة.

عندما تتمكن من تقريب الجسمين ونثبتهما في تلك الوضعية، فإنهما سيخزنان طاقة كامنة (potential energy) أتت من الطاقة التي بذلناها كشغل لوضعهما في تلك الوضعية، وسيتم إطلاق تلك الطاقة الكامنة بمجرد نفلت الجسم الحر وستتحول لطاقة حركية (kinetic energy) أثناء ابتعاد الجسم الحر عن الجسم المثبت، لو فكرنا في الموضوع فسنجد أن مقدار هذه الطاقة الكامنة لن يزيد ولن ينقص عن مقدار الشغل الازم لتقريب الجسمين في خط مستقيم بغض النظر عن المسافة التي قطعتها أثناء تقريب الجسمين.

في حالة الجسمين السابقين فالقوة التي نريد التغلب عليها هي القوة الكهربائية، ولابد أن نقوم نحن بشغل بقوة مساوية للقوة الكهربائية لكن في الاتجاه المعاكس $-F = qE$ كي نتمكن من تقريب الجسمين لبعض، نحن لدينا المعادلة $W = F\,r$ لحساب مقدار الشغل المطلوب لكن المشكلة أن مقدار القوة الكهربائية يتغير في المجال الكهربائي، ومن ثم مقدار الشغل سيختلف عند كل نقطة.

يمكننا حل هذه المشكلة بحساب مقدار الشغل الازم لتقريب الجسم جزء صغير من المسافة dr قبل يكون هناك أي تغيير معتبر في قيمة القوة وستعطينا معادلة الشغل قيمة جزء صغير من مقدار الشغل:

$$\mathrm{d}W = F\,\mathrm{d}r$$

وكي نحصل على القيمة الكاملة للشغل ولكامل المسافة فإننا نحتاج لجمع هذه المقادير الصغيرة:

$$\int \mathrm{d}W = \int F\,\mathrm{d}r$$

حساب الجزء الأسير من المعادلة بسيط:

$$W = \int F\,\mathrm{d}r$$

ولحساب الجزء الأيمن، نعوض قيمة F في التكامل بقيمة القوة الازمة مننا وهي كما قلنا عكس قوة المجال الكهربائي $-qE$، ونعوض قيمة E في تلك القيمة بالقيمة الأصلية kQ/r^2:

$$\begin{aligned} W &= \int -qE\,\mathrm{d}r \\ &= -q\int k\frac{Q}{r^2}\,\mathrm{d}r \end{aligned}$$

ثم نحسب التكامل ونبسط المعادلة:

$$\begin{aligned} W &= -qkQ\int r^{-2}\mathrm{d}r \\ &= -qkQ(\frac{-1}{r}) \end{aligned}$$

هكذا حصلنا على معادلة تعطينا مقدار كامل الشغل الازم لتغيير مكان جسم مشحون إلى نقطة معينة وكذلك مقدار الطاقة الكهربائية الكامنة لو وضعنا جسم عندها:

$$W = k\frac{qQ}{r}$$

ووحدة الشغل كما قلنا هي الجول J، لنسمي قيمة الشغل هذه والتي تعبر أيضاً عن مقدار الطاقة الكهربائية الكامنة.

كل نقطة تتطلب مقدار شغل مختلف حتى تضع جسم مشحون آخر فيها، وسبق أن قلنا أن المجال الكهربائي ينشأ بمجرد أن يصبح الجسم مشحون ويمتد هذا المجال للانهاية، لذا فالنقطة التي بدأنا منها أساساً كان لديها جهد كهربائي خاص مختلف عن الذي توقفنا عنه - قد يكون صفر لو كان الجسم بعيد، إذاً فالقيمة التي سنحصل عليها دائماً عبارة عن فرق بين قيمين.

لنسمي هذا المقدار بفرق الجهد الكهربائي والذي يسمى أيضاً بالفولتية (voltage) ونعرفه بأنه مقدار الشغل الازم لتحريك جسم مشحون ذو شحنة موجبة q من نقطة لنقطة أخرى في المجال الكهربائي (الرمز Δ يعني أن القيمة V عبارة عن فرق أو طرح قيمتين):

$$\Delta V = \frac{W}{q}$$

أو بعد تعويض قيمة W:

$$\Delta V = k\frac{Q}{r}$$

وحدة قياس فرق الجهد الكهربائي هي JC^{-1}، نظراً لأهمية فرق الجهد الكهربائي وكثرة استخدمه فقد أعطيت وحدته اسماً خاص يختصرها وهي الفولت (volte) ويرمز لها بالحرف V، جرت العادة ألا يتم كتابة الرمز Δ عند الإشارة لفرق الجهد الكهربائي ويكتفى فقط بالرمز V.